

Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio  
no crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis*Effect of water availability and application of potassium and  
sodium on the growth in diameter of *Eucalyptus grandis* treesVinicius Resende Castro<sup>1</sup>, Paula Gabriella Surdi<sup>2</sup>, Mario Tomazello Filho<sup>3</sup>,  
Gilles Chaix<sup>4</sup> e Jean Paul Laclau<sup>5</sup>

---

**Resumo**

A expressiva área de plantações florestais de árvores de eucalipto de rápido crescimento no Brasil e em outras regiões do mundo encontra-se sob o efeito das mudanças climáticas, do estresse hídrico e da baixa fertilidade do solo, afetando o crescimento volumétrico e a qualidade do seu lenho. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o incremento do DAP do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* por 24 meses, nos tratamentos de redução da precipitação pluviométrica e de nutrição potássica e sódica. Os tratamentos foram definidos por 2 regimes hídricos (100 e 66% das chuvas, com redução artificial com lonas de polietileno) e 3 tipos de nutrição mineral: K (K - 4,5 kmol/ha), Na (Na - 4,5 kmol/ha) e controle (sem aplicação de K e Na). Foram selecionadas 54 árvores de eucalipto/tratamento e instaladas as faixas dendrométricas no DAP dos troncos. Os resultados indicaram efeito da sazonalidade climática no incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto, com períodos de maior e de menor taxa de crescimento e o meristema cambial e, desta forma, a mensuração do diâmetro do tronco com os dendrômetros indicam que a resposta a um dado evento climático se expressa após o período de 15, 30 e de até 45 dias. As árvores de eucalipto dos tratamentos sem redução de chuva apresentaram maior valor da taxa de incremento acumulado do tronco, bem como nas árvores do tratamento com aplicação de K. Os resultados podem ser utilizados na adoção de práticas silviculturais nas árvores de eucalipto nas plantações florestais de rápido crescimento em áreas afetadas pelo estresse hídrico e na substituição parcial de K por Na.

**Palavras-chave:** Nutrição; Estresse hídrico; Dendrômetros; Mudança climática

**Abstract**

Considerable areas of forest plantations of fast-growing of eucalyptus in Brazil and in other regions of the world are under the influence of climate change, water stress and low soil fertility, affecting the growth and the quality of the wood from the trees. This study aimed to evaluate the growth of the trunk of *Eucalyptus grandis* trees for 24 months, evaluating the reduction in rainfall and potassium and sodium nutrition. The treatments were defined by two water treatments (100 and 66% of rainfall, with artificial exclusion with polyethylene sheeting) and three types of nutrition: K (K - 4.5 kmol/ha), Na (Na - 4.5 kmol/ha) and control. 54 eucalyptus trees per treatment were selected and installed with a dendrometric band at DAP height. The results showed the effect of the climatic seasonality in the increase in diameter of the trunk of the tree, with maximum and minimum periods of growth rate and the cambial meristem and, therefore, the measurement of the diameter of the trunk with the dendrometers indicate that the response to a given climatic event is expressed after the period of 15, 30 and up to 45 days. Tree treatments with 100% of rainfall had higher cumulative growth, as well as treatments with application K. The results may be used as subsidies for the adoption of silvicultural practices in forest plantations in areas with water stress, as well as replacement part of K by Na.

**Keywords:** Nutrition; Induced water stress; Dendrometer

---

<sup>1</sup>Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa, - Campus Universitário -36.570-900 - Viçosa, MG, Brasil. E-mail: [vresende@gmail.com](mailto:vresende@gmail.com)

<sup>2</sup>Doutora em Recursos Florestais. USP - Universidade de São Paulo /ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Avenida Páduas Dias, 11 - Caixa Postal 09 - 13418900 - Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: [paulasurdi@usp.br](mailto:paulasurdi@usp.br)

<sup>3</sup>Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. USP - Universidade de São Paulo /ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Avenida Páduas Dias, 11 - Caixa Postal 09 - 13418900 - Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: [mtomazel@gmail.com](mailto:mtomazel@gmail.com)

<sup>4</sup>Pesquisador Doutor. CIRAD - Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique Pour le Développement - UMR AGAP, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier, França. E-mail: [gilles.chaix@cirad.fr](mailto:gilles.chaix@cirad.fr)

<sup>5</sup>Pesquisador Doutor. CIRAD - Centre de Recherche Agronomique Pour le Développement. Place Viala, 2 - prédio 12 - 34060 - Montpellier, França. E-mail: [laclau@cirad.fr](mailto:laclau@cirad.fr)

## INTRODUÇÃO

As áreas de implantação dos programas de reflorestamento com eucalipto no Brasil são, de modo geral, de baixa fertilidade, com deficiência de potássio e de outros minerais e com déficit hídrico (GAVA, 1997; GONÇALVES et al., 2004). Nesse sentido, para a expansão das plantações florestais no país é determinante compreender a interação dos minerais, como o Na e o K e a disponibilidade hídrica, e o seu efeito na sazonalidade cambial, no crescimento e na qualidade do lenho das árvores de eucalipto.

Por outro lado, a substituição total ou parcial do K por Na em plantações florestais, segundo Marschner (1995), apresenta interesse prático e científico. As matérias primas que são fontes de K, contendo Na em sua composição, requerem menor energia no processo de purificação, permitindo com isso, uma redução no preço final dos fertilizantes. A literatura científica reporta que esses elementos minerais têm influenciado no balanço hídrico do lenho das árvores e têm aumentado a sua eficiência no uso da água, sob condições de estresse hídrico e, por consequência, na sua resistência aos períodos de seca (ALMEIDA et al., 2010).

Desta forma, na implantação de florestas em solos com sais minerais em excesso de sais, faz-se necessária a utilização de genótipos selecionados para tolerância à salinidade ou sodicidade (MENDONÇA et al., 2010). Segundo Marschner (1995), essa característica de tolerância das plantas parece determinada pela sua capacidade em impedir a translocação de sódio pelo seu sistema vascular para a sua parte aérea.

Ainda, o monitoramento contínuo do crescimento radial do tronco das árvores é fundamental para entender a resposta aos estímulos e variações das condições climáticas, como a temperatura, precipitação e déficit de pressão de vapor, bem como, os decorrentes da aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos (SETTE JUNIOR et al., 2010). Os dendrômetros permanentes são uma opção eficiente na medição contínua, com elevada precisão e baixo custo do crescimento em diâmetro do tronco das árvores de florestas tropicais e temperadas em curto intervalo de tempo (BOTOSSO; TOMAZELLO FILHO, 2001; DÉTIENNE et al., 1988; MARIAUX, 1969; BOTOSSO; SETTE JUNIOR et al., 2010). As faixas dendrométricas de aço, segundo Marcati (2000) podem contrair na estação do inverno e dilatar no verão ocasionando variação dimensional no seu comprimento. Segundo Drew (2009) os dendrômetros são uma ferramenta de alta precisão na análise temporal e espacial do incremento em diâmetro do tronco das árvores. O autor cita, ainda, os trabalhos de Dobbs (1969), Lapoint e Van Cleve (1971) e Pook e Hall (1976) que obtiveram uma precisão de leitura do incremento do tronco das árvores de 0,038; 0,02 e 0,005 mm, respectivamente, comprovando a sua acurácia na experimentação florestal.

Pelo exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da disponibilidade de água e da aplicação do K e do Na no incremento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*, por 24 meses, e sua relação com as variáveis climáticas e teor de umidade do solo, utilizando faixas dendrométricas. Os resultados do trabalho constituem-se em subsídio para as práticas silviculturais nas áreas de plantações florestais com estresse hídrico ou afetadas pelas mudanças climáticas, incluindo a substituição parcial do K pelo Na, além do melhor entendimento da dinâmica da ecofisiologia das árvores de *E. grandis* em plantações florestais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, localizado nas coordenadas 22°K 743005,29 E e 74°49894,70 S. O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Köppen, com precipitação anual média de 1.635 mm e temperatura média de 16,2 e 28,6 °C, nos meses mais frio e mais quente, respectivamente. O solo é classificado como latossolo vermelho amarelo distrófico, de textura média, com a litologia composta por arenito, formação Marília, do grupo Bauru. A análise química do solo, até 6 m de profundidade, feita por Maquère (2008) indicou o teor médio do K e do Na trocável de 0,02 cmolc.kg<sup>-1</sup> até 5 cm e inferior a 0,01 cmolc.kg<sup>-1</sup> entre 0,05-6 m de profundidade do solo, comprovando a severa deficiência de nutrientes.

O experimento foi implantado em maio de 2010, com o plantio do clone de *Eucalyptus grandis* da empresa Suzano Bahia Sul, no espaçamento 3 x 2 m. A fertilização básica foi realizada no plantio, distribuída a lanço e sem incorporação no solo, de 2000 kg de calcário dolomítico/ha e, posteriormente, com a aplicação na cova de 75 kg de  $P_2O_5$ , 80 kg de N ( $NH_4(SO_4)_2$ ) e 20 kg de FTE (BR-12)/ha.

O delineamento experimental foi o de blocos subdivididos, tipo "split-plot", com 3 blocos e 6 tratamentos, totalizando 18 subparcelas, compreendendo: (i) 2 regimes hídricos (100 e 66% de chuvas, com a sua exclusão pela cobertura do solo com 1700 m<sup>2</sup> de lona de polietileno) (a disponibilidade hídrica como fator principal) e (ii) 3 doses de fertilizantes (0, controle); 4,5 kmol/ha e 4,5 kmol/ha na forma de KCl e NaCl, respectivamente, aplicados 3 meses, após o plantio) (nutrição como fator secundário). Para cada bloco foram sorteados, inicialmente, os 2 tratamentos de regime hídrico (100 e 66% de chuvas) e, na sequência, os 3 tratamentos de nutrição (controle, K e Na) identificados como: (a) C/+A, controle a 100% de chuva; (b) Na/+A, Na a 100% de chuva; (c) K/+A, K a 100% de chuva; (d) C/-A, controle a 66% de chuva; (e) Na/-A, Na a 66% de chuva; (f) K/-A, K a 66% de chuva.

Foram instalados dendrômetros de aço para a avaliação do incremento em diâmetro no DAP do tronco de 3 árvores de eucalipto/subparcela, com 9 árvores de eucalipto/tratamento, com um total de 54 árvores em delineamento de blocos casualizados. Os dendrômetros foram instalados no tronco das árvores de eucalipto da 1ª linha da parcela útil, intercaladas entre si, representando o tratamento das 36 árvores centrais da subparcela. Os dendrômetros foram confeccionadas segundo Botosso e Tomazello Filho (2001) com fita de aço inoxidável (12,7x0,15 mm, largura e espessura, escala em mm e nônio, precisão de 0,2 mm) tracionadas por mola de aço inoxidável (100 x 8 mm, comprimento e diâmetro) (Figura 1A, D). O comprimento da faixa dendrométrica foi determinado considerando a circunferência do DAP do tronco das árvores, adicionando 17 cm, para a sobreposição da escala e do nônio, com a sua graduação feita com um gabarito (Figura 1B, C) contendo 2 placas metálicas, a 1ª, na borda inferior (escala de leitura de graduação de 80 mm) e a 2ª, na borda superior (escala de 10 divisões do nônio).



**Figura 1.** (A) Faixa dendrométrica instalada no tronco de árvore de eucalipto; (B) sobreposição da escala e do nônio, (C) gabarito (D) faixa dendrométrica com escala e mola.

**Figure 1.** (A) dendrometer band installed on a eucalyptus tree; (B) detail of the scale and vernier; (C) recording (D) dendrometer band with scale.

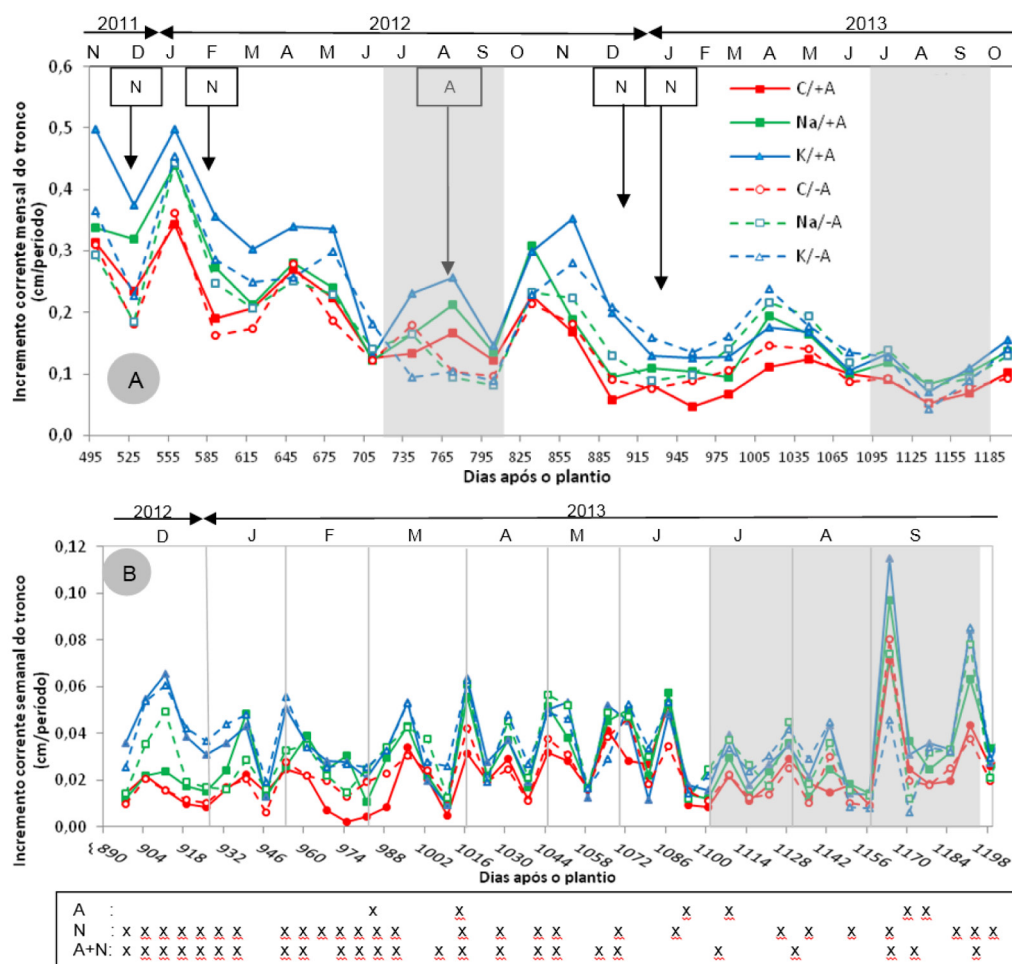
O incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto foi mensurado, a cada 30 dias (período da manhã), pelo deslocamento da escala sobreposta da faixa dendrométrica de novembro de 2011 a novembro de 2013 (18º e 43º mês de plantio, respectivamente). De dezembro de 2012 a novembro de 2013 os dendrômetros foram lidos a cada 7 dias, para a avaliação mais precisa das variáveis climáticas no incremento do tronco das árvores de eucalipto. A temperatura média, máxima e mínima e a precipitação acumulada foram coletadas, diariamente, de outubro de 2011 a novembro de 2013 na Estação Meteorológica da Estação Experimental, localizada a 50 metros de distância do plantio; o teor de umidade em diferentes profundidades do solo foi determinado, a cada 7 dias, pela norma ASTM D4959. Os dados climáticos foram agrupados em períodos de 15,

30 e 45 dias, anteriores aos da avaliação do incremento do tronco das árvores de eucaliptos, pelos dendrômetros. Na análise da correlação de Pearson foi utilizado o valor do incremento em diâmetro do tronco das árvores determinando a influência das variáveis climáticas, em escala temporal a resposta em crescimento do tronco das árvores (*lag do crescimento*) em relação à data de ocorrência do evento climático.

Nas análises estatísticas foi aplicado o programa SAS, sendo aferidos os “outliers” e a escala pelo Método de Potência Ótima de Box-Cox para a melhor transformação. A análise da variância (ANOVA) foi utilizada para verificar o efeito dos tratamentos e, quando significativo, aplicado o teste de Tukey a 95% de probabilidade. Na análise do incremento em diâmetro do tronco das árvores foram aplicados os testes de correlação com as variáveis climáticas e a regressão pelo procedimento “stepwise”. A análise da autorregressão foi aplicada para determinar o período de defasagem (*lag*) indicativo da resposta do crescimento em diâmetro do tronco das árvores em relação à ocorrência da variável climática.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos 6 tratamentos de nutrição e de disponibilidade hídrica (Figura 2A, B), referentes à medição do incremento corrente do DAP do tronco das árvores de eucalipto, a cada 7 e 30 dias, com as faixas dendrométricas, no período de novembro de 2011 a outubro de 2013, indicou significativas variações sazonais.



**Figura 2.** Avaliação mensal (A) e semanal (B) do incremento corrente do DAP do tronco das árvores de eucalipto nos 6 tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica com diferença significativa. A área sombreada representa a estação seca (julho a setembro). “X” indica o efeito significativo da disponibilidade hídrica “A”; da nutrição mineral “N”; e a interação do regime hídrico e a nutrição “A + N”

**Figure 2.** Monthly evaluation (A) and weekly (B) trunk increment of eucalyptus trees in the six treatments of nutrition and water availability, with significant differences. The area shaded in gray represents the dry season (July to September). “X” indicates the significant of effect of water availability “A”; factor type of nutrition “N”; and interaction between water regime and nutrition “A + N”

No 1º ano da avaliação mensal do incremento corrente do DAP do tronco das árvores, o valor de incremento mais alto, variou de 0,22 a 0,50 cm, em novembro de 2011, janeiro, abril e outubro de 2012; no 2º ano, o maior incremento do DAP do tronco variou de 0,16 a 0,28 cm, em novembro de 2012, abril e maio de 2013. Por outro lado, o menor valor de incremento do DAP do tronco no 1º ano foi de 0,08 a 0,32 cm em dezembro de 2011, fevereiro, março e de junho a setembro de 2012; no 2º ano, variou de 0,04 a 0,20 cm em dezembro de 2012, janeiro, fevereiro e de junho a setembro de 2013 (Figura 2A).

A avaliação semanal do incremento do DAP do tronco das árvores (Figura 2B) possibilitou uma caracterização detalhada do efeito das variações climáticas, principalmente, da precipitação e da temperatura. A análise estatística indicou que a disponibilidade hídrica exerceu influência no incremento do DAP do tronco das árvores em semanas específicas no período de avaliação. A nutrição e a sua interação com os 2 fatores exerceram, por sua vez, maior influência no DAP do tronco das árvores, na avaliação semanal, de dezembro de 2012 a maio de 2013, caracterizado como um período de chuvas mais frequentes. No período analisado concluiu-se que a nutrição foi determinante para as diferenças significativas no DAP do tronco das árvores observadas entre os tratamentos.

De modo geral, houve diferença significativa no incremento corrente do DAP do tronco das árvores, nos 6 tratamentos, no período caracterizado como o de maior taxa de incremento diamétrico. Nesse período, as árvores no estágio fenológico com folhas maduras e limbo expandido, dispunham de maior de água no lençol freático, e de temperatura e luminosidade favoráveis, propiciando maior taxa de fotossíntese e de biossíntese da seiva orgânica (hormônios e carboidratos) translocados pelo floema e induzindo maior taxa de divisão das células do meristema cambial e, assim, resultando em maior taxa de crescimento em diâmetro do tronco das árvores. Os períodos de menor incremento do tronco das árvores foram os de menor precipitação (menor disponibilidade de água no lençol freático), de temperatura e de fotoperíodo.

Os resultados da relação do crescimento do tronco das árvores de eucalipto e as condições climáticas corroboram com os de Sette Júnior et al. (2010, 2012); Laclau et al. (2013) observaram que as raízes de árvores de *E. grandis*, com 12 meses atingem 6 m de profundidade do solo possibilitando a absorção da água e sais minerais nas camadas mais profundas.

Nos 12 meses iniciais, as maiores taxas de incremento corrente do DAP do tronco das árvores de eucalipto foram nos tratamentos submetidos a nutrição com K e Na independente da disponibilidade hídrica. No entanto, no início do 2º ano (outubro de 2012), verificou-se uma maior taxa de crescimento do DAP do tronco das árvores de eucalipto do tratamento de redução de chuva, após a recarga de água no lençol freático. Esse resultado parece relacionado ao fato de que (1) nos 2 anos iniciais houve um aumento da temperatura na superfície do solo pela lona de plástico propiciando microclima favorável ao crescimento das árvores, mesmo com a redução de chuva, conforme indicam Cheesman e Winter (2013). Ainda, (2) nos primeiros anos houve disponibilidade da água das camadas mais profundas do solo e, (3) com o desenvolvimento das raízes finas e/ou raízes jovens com a ativação fisiológica/funcional dos seus pelos absorventes (com estrutura primária) pelo processo de absorção de água e de sais minerais presentes nas camadas mais profundas do solo, estimulada pela redução de chuva, como resposta adaptativa ao estresse hídrico (raízes finas são mais sensíveis à menor quantidade de chuvas no período mais seco, absorvendo de forma rápida e eficiente a água disponível), conforme afirmaram Laclau et al. (2013) e (4) a redução de 34% da chuva não foi, possivelmente, suficiente para induzir um estresse hídrico para afetar o crescimento do tronco das árvores de eucalipto. Segundo as hipóteses de Battie Laclau et al., (2013, 2014), as características das árvores de eucalipto (área e tempo de vida das folhas, atividade fotossintética, densidade e área dos estômatos e trocas gasosas, alocação do carbono), na mesma área experimental, são afetadas pelo déficit de pressão de vapor e % de umidade na profundidade do solo, temperatura mínima do ar, etc.

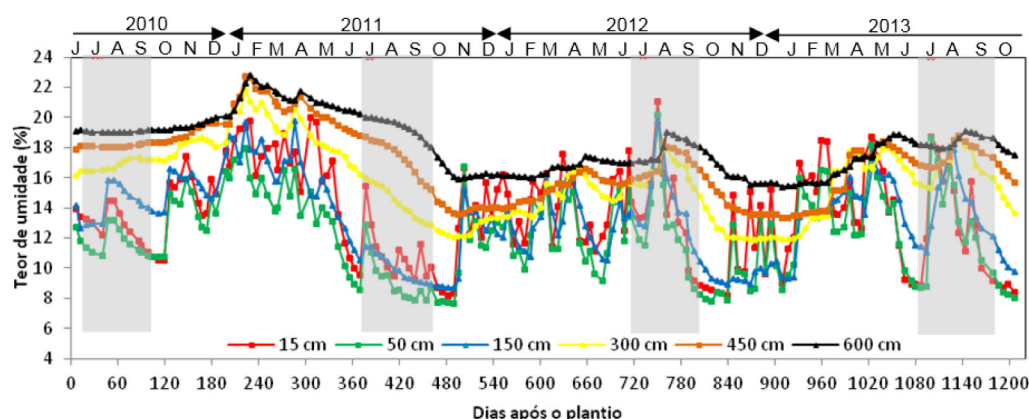
De junho a setembro de 2012 verificou-se a menor taxa de crescimento do diâmetro do tronco das árvores de eucalipto; com a maior taxa de crescimento do tronco a partir de agosto de 2012 com 0,2 mm de precipitação pluviométrica e de 17,6º C de temperatura. Em agosto de 2012, as árvores de eucalipto evidenciaram um aumento do incremento corrente do DAP do tronco nos tratamentos sem redução de chuva; ao contrário, as árvores de eucalipto mostraram uma redução do crescimento do diâmetro do DAP do tronco com a redução de chuva, de julho a setembro de 2012 (Figura



2A). Em agosto de 2012, as raízes das árvores de eucalipto dos tratamentos sem redução de chuva dispunham da água presente nas camadas (principalmente entre 450 a 600 cm) profundas do solo (Figura 3). As árvores de eucalipto apresentaram redução do incremento em diâmetro do tronco pela menor disponibilidade de água no solo dos tratamentos com redução de 66% de chuva; em setembro e outubro de 2012, a recarga do lençol freático no início das chuvas propiciou a recuperação do ritmo do incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto de todos os tratamentos.

A redução do diâmetro do DAP do tronco das árvores de eucalipto em agosto de 2012 foi, da mesma forma, detectada em dezembro de 2011 e de 2012, e fevereiro e junho de 2012 e de 2013, com 107 mm/21°C, 191 mm/23°C, 212 mm/23°C; 228 mm/21°C, 157 mm/16°C e 214 mm/17°C de precipitação acumulado e de temperatura média, respectivamente. A diminuição da taxa de crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto em dezembro de 2011 e janeiro de 2013 foi verificada por Laclau et al. (2005) e Sette Júnior et al. (2010, 2012), indicando que, cerca de 2 meses após as primeiras chuvas ocorre um decréscimo da taxa de incremento em diâmetro do tronco, como resultado da alocação dos hormônios e carboidratos (seiva orgânica) para os meristemas apicais das folhas (recomposição da copa) e das raízes finas (expansão do sistema radicular), em detrimento do meristema cambial do tronco. Pode-se atribuir, da mesma forma, que a diminuição da taxa de crescimento do tronco das árvores, deve-se à saturação da água no solo (influenciando na respiração e absorção de água e sais minerais pelas raízes) (Figura 3) e pela maior frequência de dias nublados ou redução de horas de luz/dia (afetando a transpiração das árvores e a taxa de fotossíntese).

O modelo de crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto do experimento tem sido, comumente, observado em árvores da espécie em áreas de experimentação e em plantações comerciais (ALMEIDA et al., 2010; SETTE JÚNIOR, et al., 2010, 2012) caracterizado pela elevada taxa de incremento do tronco nos primeiros meses após o plantio, seguindo-se a sua estabilização pela demanda dos fatores de crescimento (água, nutrientes, luz, etc.).

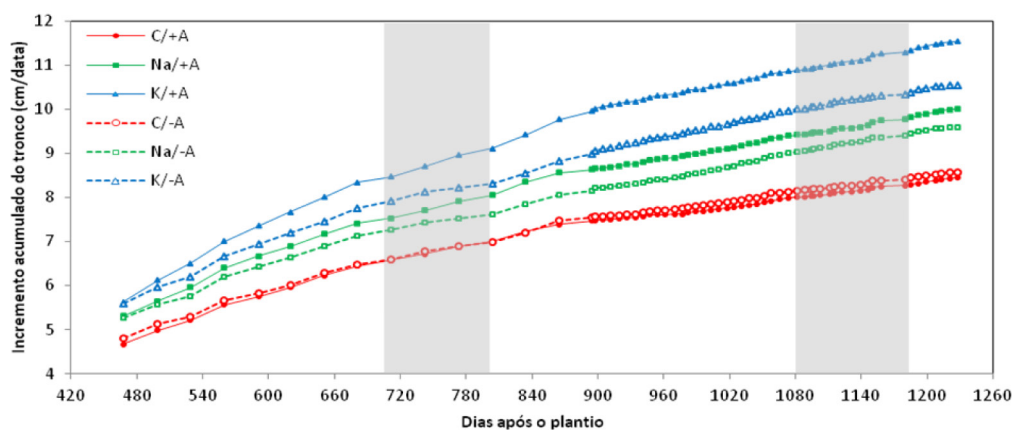


**Figura 3.** Variação semanal do teor de umidade a diferentes profundidades do solo de junho de 2010 a outubro de 2013, com a área sombreada indicando a estação seca (julho a setembro).

**Figure 3.** Weekly variation of moisture content at different soil depths from June 2010 to October 2013; with the grey area indicating the dry season (July to September).

As características da curva de incremento acumulado do diâmetro do tronco das árvores de eucalipto refletem o efeito dos tratamentos, exceto para os de nutrição controle e os de com e sem redução de chuva (C/-A e C/+A) (Figura 4). A taxa de incremento acumulado do diâmetro do tronco das árvores no período inicial de avaliação em novembro de 2011 é similar em todos os tratamentos pela água presente no lençol freático; nos meses subsequentes, verifica-se uma maior taxa de incremento do diâmetro do tronco das árvores do tratamento com K, com e sem redução de chuva (K/+A e K/-A), seguindo-se o Na, com e sem redução de chuva (Na/+A e Na/-A) e no final as do controle, com e sem redução de chuva (C/-A e C/+A). O maior incremento do tronco foi observado nas árvores com K, seguindo-se as com Na e as do controle, independente da disponibilidade hídrica no solo.

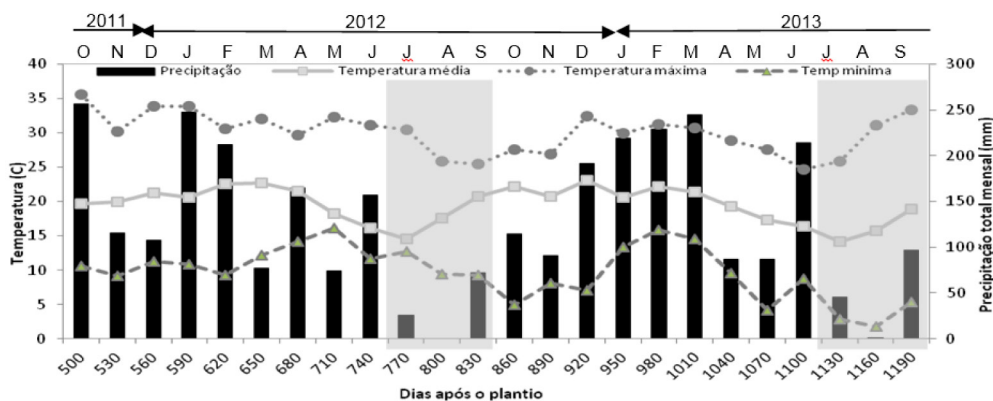
O tempo de avaliação do crescimento do tronco foi de 24 meses, mas verificou-se a necessidade da continuidade das mensurações até o final da rotação, o que possibilitaria o monitoramento das árvores e a projeção da produtividade dos plantios florestais, submetidos ao estresse nutricional e hídrico.



**Figura 4.** Incremento acumulado do DAP do tronco das árvores de eucalipto nos 6 tratamentos de nutrição e de disponibilidade hídrica, com a área sombreada indicando a estação seca (julho a setembro).

**Figure 4.** Accumulated increase trunk of BHD of eucalyptus trees in 6 treatments of nutrition and water availability, with the shaded area indicating the dry season (July to September).

Os períodos de maior e menor crescimento do DAP do tronco árvores de eucalipto foram relacionados com a intensidade de precipitação, conforme mencionado. O menor crescimento do tronco foi verificado em dezembro de 2011, março, maio, julho a setembro de 2012, com valor de precipitação limitante e acumulado de 107, 77, 74, 25, 0 e 72 mm, respectivamente; ainda, temperatura média diminuiu de abril a julho de 2012 e de abril a julho de 2013 com valor de 21,5 a 14,6° C e de 19 a 14,2° C, respectivamente. Assim, o período de diminuição da taxa de crescimento do DAP do troco das árvores corresponde ao de menor precipitação e de temperatura (Figura 5). Esse comportamento do crescimento do tronco das árvores e valor das 2 variáveis climáticas são corroborados por Laclau et al. (2005), Sette Júnior et al. (2012) em experimentação no mesmo local e de Battie Laclau (2013).



**Figura 5.** Valores mensais de precipitação e de temperatura no período de estudo, com a área sombreada indicando a estação seca (julho a setembro).

**Figure 5.** Monthly values of precipitation and temperature during the study period, with the shaded area indicating the dry season (July to September).

O incremento corrente do DAP do tronco das árvores não mostrou correlação significativa com a média das variáveis climáticas (Tabela 1), exceto para a precipitação, com valor de 0,61, assim positiva e significativa, indicando o maior incremento do tronco das árvores no mês de maior incidência de chuva resultando no aumento do volume de água no lençol freático e consequentemente da recarga de água do solo.

Ainda, é importante determinar o estímulo do crescimento do diâmetro do tronco das árvores em resposta à ocorrência do evento climático (*lag*) para 15, 30 e 45 dias de antecedência desse evento (Tabela 1), indicando correlação significativa com a temperatura e teor de umidade do solo, a diferentes profundidades, sendo corroborado por inúmeros autores (BOTOSSO et al., 2005; DREW et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011; SETTE JUNIOR et al., 2010, 2012; WIMMER et al., 2002).

**Tabela 1.** Coeficiente de correlação das variáveis climáticas e o incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto, antes e depois da defasagem (lag) de 15, 30 e 45 dias.

**Table 1.** Correlation coefficient of climate variables and increment in diameter before and after the delay (lag) of 15, 30 and 45 days.

Parâmetro	Coeficiente de correlação	
	Antes	Depois
Precipitação	0,61	
U (300)		Lag 45 (0,62) *
		Lag 15 (0,66) *
U (450)		Lag 30 (0,70) *
		Lag 45 (0,75) *
U (600)		Lag 15 (0,68) *
		Lag 45 (0,73) *
Temperatura		Lag 30 (0,63) *

\* significativo a 95% de probabilidade; U300, 450, 600: teor de umidade do solo a 300, 450 e 600 cm

A correlação as variáveis climáticas com o incremento do DAP do tronco das árvores por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica) foi baixa no mês de avaliação (lag 0) (Tabela 2). Nos tratamentos com redução de chuva (C/-A; Na/-A; K/-A) as árvores de eucalipto com déficit hídrico (induzido pela redução de chuva) mostraram-se mais sensíveis à variação da precipitação. No entanto, com a defasagem do evento climático (lag) verifica-se o aumento da correlação do estímulo da taxa de incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto. Assim, para a defasagem (lag) de 15 dias verifica-se um aumento da correlação; para a defasagem (lag) de 45 dias, da mesma forma, a correlação do estímulo da taxa de incremento e a variável climática com maior valor do incremento do tronco das árvores e o teor de umidade a 450 e 600 cm de profundidade do solo. Por outro lado, a correlação do estímulo do crescimento do tronco das árvores foi baixa ou inexistente em relação ao teor de umidade na camada superficial do solo, considerando a perda de água por evaporação ou percolação, com resultados similares apresentados por Almeida et al (2010), Sette Junior et al. (2010) e Oliveira et al. (2011).

**Tabela 2.** Coeficiente de correlação das variáveis climáticas e incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto nos 6 tratamentos, antes e depois da defasagem (lag) de 15, 30 e 45 dias.

**Table 2.** Correlation coefficient of climate variables and increase in diameter in 6 treatments before and after the delay (lag) of 15, 30 and 45 days.

Parâmetro	Lag (dias)	Antes						Depois					
		C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A	C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A
U150	0						0,58*						
U300	45							0,61*	0,67*	0,65*			0,60*
	0		0,64*										
U450	15							0,66*	0,73**	0,68*		0,61*	0,62*
	30							0,66*	0,71**	0,70*	0,59*	0,67*	0,71**
	45							0,68*	0,73**	0,74**	0,63*	0,72**	0,76**
	0	0,58*	0,64*										
U600	15							0,61*	0,67*	0,65*	0,58*	0,69*	0,72**
	30							0,63*	0,66*	0,67*	0,64*	0,74**	0,78**
	45							0,63*	0,65*	0,68*	0,62*	0,74**	0,79**
	15											0,61*	0,62*
Temp.	30							0,64*			0,58*	0,65*	0,67*
	45							0,62*			0,59*	0,67*	0,71**
Precipit.					0,60*	0,73**	0,67*						0,61*

\*signific. a 95% prob.; \*\*signific. a 99% prob.; U300, 450, 600: teor de umidade do solo a 300, 450 e 600 cm, Precipit.: Precipitação

A precipitação foi a variável climática que se relacionou com a taxa de incremento médio do DAP do tronco das árvores de eucalipto nos tratamentos pela regressão *Stepwise* (95% probabilidade), excluindo-se as não significativas (teor de umidade do solo; temperatura média, máxima e mínima). Assim, cerca de 30% da variação total do incremento do DAP do tronco das árvores pode ser explicada pela precipitação pelo modelo de regressão (Equação 1).

$$IC = 0,156 + 0,001 * Precipitação \quad (1)$$



A construção de modelos dos processos ecofisiológicos das árvores de eucalipto permitem explicar a variação do crescimento e desenvolvimento do seu tronco – pela interação com o meristemas apicais e cambial - e às condições climáticas. A relação da taxa de incremento radial do tronco das árvores de eucalipto com a precipitação, analisando o efeito do déficit hídrico na atividade cambial e a consequente diminuição da produtividade das plantações florestais é abordada na literatura (OLIVEIRA et al., 2011; BOTOSSO et al., 2005).

A maior eficiência do processo de fotossíntese nas folhas da copa das árvores relaciona-se com uma faixa de temperatura, afetando a produtividade florestal na temperatura acima ou abaixo desta faixa. Assim, neste contexto, as árvores de eucalipto no presente trabalho evidenciam plasticidade fenotípica em relação à variação da temperatura, mantendo a taxa de crescimento volumétrico, desde que não haja restrição dos demais fatores de crescimento, destacando que nas regiões tropicais e subtropicais, de modo geral, a água e nutrientes são os fatores mais relevantes à produção florestal (BARROS; COMERFORD, 2002). Ainda, em relação aos mecanismos fisiológicos das plantas, o fechamento dos estômatos, em condição de estresse hídrico, restringem a absorção de CO<sub>2</sub> e, consequentemente, o crescimento volumétrico (BLAKE; TSCHAPLINSKI, 1992). As árvores de *E. grandis* possuem mecanismos de otimização do efeito do estresse hídrico, pela redução da condutância estomática e diminuição da taxa de transpiração em relação à absorção de CO<sub>2</sub>, aumentando a eficiência da utilização da água.

O maior crescimento e o aumento da demanda de água resultou nas árvores de eucalipto com adubação potássica e sem redução de chuva (K/+A), de acordo com Battie Laclau et al. (2013), em maior vulnerabilidade ao estresse hídrico severo. Assim, as mudanças climáticas com aumentos de eventos extremos como a redução da intensidade de chuvas e secas prolongadas implicarão em situação de risco para as árvores de eucalipto das plantações de rápido crescimento exigindo manejo silvicultural adequado, com a diminuição da densidade de plantio e da dosagem de fertilizantes, e plantio de clones resistentes à seca e com maior eficiência no uso da água, propiciando a sobrevivência das árvores em níveis adequados de produtividade de madeira.

## CONCLUSÕES

Os autores agradecem aos pesquisadores do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônoma para o Desenvolvimento (CIRAD/França) e do Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras da Escola Superior de Agricultura (ESALQ-USP), bem como, à equipe de apoio da Estação Experimental de Itatinga (SP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte durante o desenvolvimento do trabalho e pelo financiamento da pesquisa. O presente trabalho só foi possível devido a aprovação de inúmeros projetos de pesquisa a saber: CNPq (444793/2014-3 e 014/2012), Agropolis Fondation (ID 1203-003), Labex Agro/ANR-10-LABX- 0001-01 e FAPESP (2013/25642-5).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônoma para o Desenvolvimento (CIRAD/França) e do Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras da Escola Superior de Agricultura (ESALQ-USP), bem como, à equipe de apoio da Estação Experimental de Itatinga (SP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte durante o desenvolvimento do trabalho e pelo financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. C. R. LACLAU, J. P.; GONÇALVES, J. L. M.; RNAGER, J.; SAINT-ANDRE, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established oh K-deficient soils. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.259, n. 9, p. 1786-1795, 2010.

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4959**: Standard Test Method for Determination of Water Content of Soil By Direct Heating. ASTM, Philadelphia, 2016, 6 p.
- BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p. 487-592, 2002.
- BATTIE-LACLAU P.; LACLAU, J. P.; PICCOLO, M. C. P. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 371, n. 1, p.19–35, 2013.
- BATTIE-LACLAU P.; LACLAU, J. P.; BERI, C.; MUNIZ, M. R.; ARENQUE, B. C.; PICCOLO M.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J. P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v.37, n.1, p.70-81, 2014.
- BLAKE, T. J.; TSCHAPLINSKI, T. J. Water relations. In P.C. MITCHELL, L. SENNERBY-FORSSE, T. M. (Eds.). **Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops**. Amsterdam: Springer, 1992. p. 66-94.
- BOTOSSO, P. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia: avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e subtropicais. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC, 2001. cap. 7, p. 145-171.
- BOTOSSO, P. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MARIA, V. R. B.; FEDELE, L. F. Les lianes et l'accroissement de *Centrolobium tomentosum* Guill. Ex-Benth. (Papilionoideae) au Brésil. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 284, n. 2, p. 71-75, 2005.
- CHEESMAN, A.W.; WINTER, K. Elevated night-time temperatures increase growth in seedlings of two tropical pioneer tree species. **New Phytologist**, London, v. 197, n. 4, p. 1185-1192, 2013.
- DÉTIENNE, P.; BARBIER, C.; AYPUIASSORHO, H.; BETIN, F. Rythmes de croissance de quelques essences de Guyane Français. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 217, n. 1, p. 63-76, 1988.
- DREW, D. M.; GEOFFRE, Y. M.; DOWNES, G. M.; GRADY, A. P.; READ, J.; WORLEDGE, D. High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globulus*. **Annals of Forest Science**. Les Ulis, v. 66, n. 4, p. 1-10, 2009.
- DREW, D. M.; GRADY, A. P.; DOWNES, G. M.; READ, J.; WORLEDGE, D. Daily patterns of stem size variation in irrigated and no irrigated *Eucalyptus globulus* **Tree Physiology**, Oxford, v. 28, p. 1573–1581, 2008.
- DOBBS, R.C. An electrical device for recording small fluctuations and 13 accumulated increment of tree stem circumference. **The Forestry Chronicle**, Ontario, v. 14, n. 45, p. 187-189, 1969.
- GAVA, J. L. Efeito de adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997.
- GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p.13-64.
- LACLAU, J. P.; SILVA, E.A.; LAMBAIS, G. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Rockville, v. 4, p. 1-12, 2013.

LACLAU, J. P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J. P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, n. 1/3, p. 375-391, 2005.

LAPOINT, G., VAN CLEVE, K. A portable electronic multichannel dendrograph and environmental factor recording system. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 1, p. 263-277, 1971.

MAQUÈRE V. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing/Eucalyptus/plantations in Brazil: implications for soil sustainability**. 2008. 375 p. Thesis (Ph. D. in Forest Science) – Agro Paris Tech, Paris, 2008.

MARCATI, C. R. **Sazonalidade cambial em espécies tropicais**. 2000. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

MARIAUX, A. La périodicité des cernes dans les bois de limba. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 128, n. 1, p. 39-53, 1969.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MENDONÇA, A. V. R.; CARNEIRO, J. G. A.; FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G. Características fisiológicas de mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 255-267, 2010.

POOK, E. W., HALL, T. Effects of freezing conditions on boles of snow gum. **Journal of Forest Science**, Prague, v. 22, p.370-376, 1976.

OLIVEIRA, B. R. U.; LATORRACA, J. V. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 499-508, set. 2011.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOUSADA, J. L. P. C.; LACLAU, J. P. Sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* pelo uso de dendrômetros. **Ciência Florestal**, Santa Maria. v. 22, n. 4, p.763-775, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; LACLAU, J. P. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 43, n. 6, p. 979-990, 2010.

WIMMER, R.; DOWNES G. M.; EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. **Tree Physiology**, Oxford, v. 22, n. 7, p. 449-457, 2002.

Recebido em 12/01/2016

Aceito para publicação em 20/07/2016

